



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Desarrollo de un procedimiento para una correcta interpretación y control de tolerancias geométricas

Development of a procedure for an adequate GD&T interpretation and control

Autor

Carlos Arregui Untoria

Director/es

José Antonio Yagüe Fabra

Máster en Ingeniería Industrial

Universidad de Zaragoza

2016



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Carlos Arregui Untoria

con nº de DNI 73018820-F en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Máster _____, (Título del Trabajo)

Desarrollo de un procedimiento para una correcta interpretación y control de tolerancias geométricas.

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 24 de Noviembre de 2016

Fdo: _____

Resumen

La industria del automóvil está inevitablemente ligada con términos como la precisión y el control. El constante crecimiento al que esta industria se ha visto sometida viene de la mano con la mejora e inversión que ha habido a la par en la calidad, desde el inicio y creación de un producto hasta el último paso en su producción.

Por ello, y desde la experiencia de haber trabajado el departamento de I+D en Valeo Térmico, el objetivo de este trabajo es cubrir una necesidad en términos de la calidad, ya que actualmente no se conoce cómo realizar análisis de capacidad de aquellas cotas establecidas como características especiales, que han sido definidas como cotas geométricas, o que son afectadas por modificadores, como por ejemplo por una condición de máximo material.

Para ello, se han investigado los métodos tradicionales a la hora de realizar estos análisis, se han identificado los problemas que surgen de las particularidades de este tipo de acotación y propuesto un método para solucionarlos.

Por último, se han analizado los resultados e identificado un posible punto de mejora en el método propuesto, estableciendo así líneas futuras de investigación sobre el mismo.

Abstract

Automotive industry is connected with precision and control. Continuous growth of the sector has something to do with the parallel improvement and investment that qualities departments have undergone.

With the self experience of working in this department at Valeo Térmico, the main target of this paper is the fact of fulfilling a necessity that the firm had. This consists on making the process capability analysis with GD&T, since there are not methods known when a maximum material condition is being applied, for instance.

In order to do it, current methods of traditional tolerancing have been researched, the particular issues of GD&T have been identified and a method to solve them is being proposed.

Finally, results have been analyzed and an improvement direction of the method has been identified, so this could be a starting point of future research.

Índice

1. Objetivo y alcance.....	6
2. Introducción.....	7
2.1 Inicio del dimensionamiento.....	7
2.2 GD&T.....	7
2.3 MMC y Tolerancia de Posición.....	10
2.4 Valeo SPPC.....	12
3. Estado del arte.....	14
3.1 En qué consiste un control estadístico tradicional.....	14
3.2 Por qué no es válido un control estadístico tradicional.....	16
4. Hitos del trabajo.....	18
5. Método propuesto.....	19
5.1 Método de Wang y Luceño.....	21
6. Caso práctico.....	23
6.1 Tolerancia de posición de un taladro.....	23
6.2 Caso con MMC.....	26
6.3 Limitación del método.....	29
7. Estimación numérica.....	31
8. Conclusiones y líneas futuras.....	32
9. Bibliografía.....	33

Tabla de contenidos

2.1 Defectos no detectados con tolerancias dimensionales.....	8
2.2 Tabla de los símbolos de las tolerancias geométricas.....	9
2.3 Marco de control.....	9
2.4 Ejemplo de tolerancia de posición con mmc.....	11
2.5 Matriz de riesgo.....	12
3.1 Ejemplos de procesos distintos con mismos índices de capacidad.....	15
3.2 Ejemplo de proceso no normal.....	17
5.1 Método de puntuación Z.....	19
5.2 Distribución normal análoga a la Weibull original.....	20
6.1 Datos caso práctico.....	23
6.2 Gráficos de control	24
6.3 Test de bondad de ajuste.....	24
6.4 Resultados análisis de capacidad.....	25
6.5 Datos introduciendo MMC.....	26
6.6 Nueva área de aceptación con la especificación modificada.....	27
6.7 Resultados análisis de capacidad.....	28
6.8 Ejemplo limitación del método.....	29
6.9 Área de aceptación.....	30
7.1 Área de aceptación GD&t vs dimensionales.....	31

1. Objetivos y alcance del trabajo

El trabajo se plantea ante una necesidad de la empresa Valeo Térmico, pues se considera muy importante conocer más y saber cómo controlar unas tolerancias geométricas que se están usando en el día a día.

Actualmente el desconocimiento sobre el tema, no sólo en la automoción, sino también en otros sectores, es quizás un poco sorprendente ante la dimensión del problema planteado. Así como en la industria americana existe una cultura un poco más arraigada en cuanto al control y a la mejora de la calidad mediante el uso de este tipo de acotación, en Europa su uso ha sido introducido posteriormente, y necesita de los diseñadores, pero también de que se apueste de una manera global por ello. Esto implica inversión de recursos a nivel de equipo para su posterior control, pero sobre todo a nivel de formación, para entender en lo que consiste y hacer ver realmente que es algo útil.

El objetivo principal de este trabajo es, por lo tanto, plantar unas bases sobre las que apoyarse para más tarde realizar un procedimiento y posterior estándar Valeo a la hora de controlar cotas de esta tipología.

Para ello, se ha seguido la evolución del control y de la calidad de las diferentes dimensiones desde sus inicios, adaptando luego estos métodos con las puntualizaciones necesarias al introducir nuevas variables al dimensionamiento. El uso de las normas estaba previsto como algo fundamental a la hora de desarrollar el trabajo, pero su falta de orientación hacia estos temas no lo ha hecho posible, por lo que se ha basado principalmente en escritos de autores que han investigado previamente sobre el tema.

En primer lugar se explica lo referente a las tolerancias geométricas, así como sus ventajas y cómo y cuándo utilizarlas, así como el control de la capacidad de los procesos tradicionales. Posteriormente se expone un método para solventar los problemas aparecidos debido a las particularidades de esta manera de dimensionar. Se ha realizado un caso práctico, y finalmente se analizan las conclusiones y las líneas futuras de este trabajo.

2. Introducción

2.1 Inicio del dimensionamiento

Hoy en día, la precisión y la calidad son palabras clave en la industria del automóvil. Los constructores cada vez son más exigentes con los proveedores en cuanto a niveles de calidad. Para ello, el producto tiene que estar controlado permanentemente en las diferentes etapas de su proceso, y en función de la modalidad de este proceso y de la funcionalidad de la pieza, los medios de control, así como las tolerancias permitidas, serán unos u otros.

Pese a que la existencia de dibujos y croquis se remonta a tiempos lejanos, no fue hasta la revolución industrial cuando se inició la manufactura como la conocemos hoy en día. En estos inicios del siglo XIX, ya había planos con vistas, y ocasionalmente alguna medida, aunque esto era extraño. Esto se debía principalmente a que todo el proceso era continuo, y la comunicación, constante. Si había problemas de ajuste, se cambiaban los parámetros, limpiaba e intentaba arreglarse en el acto. Las líneas de ensamble revolucionaron este aspecto, y con las mejoras tecnológicas en la metrología se aceptó que las variaciones eran inevitables. Había, pues, que ponerle unos límites. Esto se llevó a cabo imponiendo unas tolerancias superiores e inferiores (más/menos), y el lugar en el que se plasmó fue el plano de la pieza. Así, el plano pasó de ser simplemente una reproducción de las diferentes partes a ser un método de comunicación entre los distintos departamentos.

En 1935 fueron publicados los primeros estándares para dibujo por la American Standards Association, pero solamente una escasa parte de ellos se refería al dimensionamiento. Todo cambió con la segunda guerra mundial. Muchas piezas se fabricaban y se mandaban al extranjero, pero luego fallaba el ensamblaje. El índice de rechazo era demasiado alto, y esto estaba afectando directamente a la vida de las personas. Debido a esto, en 1940 se empezó a prestar más atención al dimensionamiento, y se empezaron a desarrollar estándares más detallados tanto en Europa como en Estados Unidos.

2.2 GD&T

En el diseño de cualquier pieza, se deben tener en cuenta sus tolerancias para su fabricación y para su control posterior. Si las piezas no cumplen las tolerancias impuestas, no serán válidas, ya que su funcionalidad se verá afectada.

Es decir, las tolerancias, tanto dimensionales como geométricas, definen el tamaño y la

forma de una pieza para que funcione tal como ha sido planeado por el equipo de diseño. Es una herramienta poderosa, ya que el hecho de que esté aplicada correctamente o no lo esté afecta directamente a los gastos de producción.

En Europa se han venido utilizando principalmente las tolerancias dimensionales, si bien en los últimos años las tolerancias geométricas están empezando a tener una creciente importancia. Algunos de las ventajas de usar tolerancias geométricas (además de dimensionales) son:

- Es un sistema más flexible, permite además acotar formas complejas de maneras más sencillas.
- Se basa en las referencias de la propia pieza, llamados datums.
- Está centrada en la funcionalidad de la pieza.
- Hace la acotación más sencilla e intuitiva.
- Permite aceptar piezas que acotadas sólo con tolerancias dimensionales se estarían rechazando.
- Ahorra tiempo de interpretación de planos.
- Llegan hasta donde las dimensionales a veces no llegan, como en el caso de la imagen, donde las tres piezas pueden ser correctas desde el punto de vista dimensional, y sin embargo tienen defectos que probablemente alterarán su funcionalidad. En este caso, son defectos de rectitud, coaxialidad y perpendicularidad, que se podrían haber evitado con un acotamiento dimensional.



Figura 2.1: Tres defectos no detectados con tolerancias dimensionales.

Al final, se trata de utilizar el lenguaje gráfico más sencillo con el que comunicar cómo quieres que tu pieza sea exactamente, y esto es lo que consigue el sistema GD&T.

GD&T incluye todos los símbolos, definiciones, fórmulas matemáticas y las normas de aplicación necesarias para incorporar un lenguaje de ingeniería viable. y es un medio de especificar tanto el diseño ingenieril como sus especificaciones con respecto a la “función” que

va a tener luego y a la “relación” entre las diferentes características de las piezas. Aún más, es una técnica que, aplicada de la manera correcta, asegura la producción más económica y eficaz de estas piezas. Tanto una evaluación cuantitativa de la calidad de las piezas fabricadas como la evaluación de l mercado competitivo (competencia) y su diagnóstico de modos de fallo son partes muy importantes para una mejora continua en industrias modernas [1].

Las tolerancias geométricas pueden controlar formas individuales dentro de una pieza o definir relaciones entre varias de ellas. En la figura 2.2 se puede observar la principal clasificación de tolerancias geométricas según la norma ASME Y14.5M [2]:

	TYPE OF TOLERANCE	CHARACTERISTIC	SYMBOL	SEE:
FOR INDIVIDUAL FEATURES	FORM	STRAIGHTNESS	—	6.4.1
		FLATNESS		6.4.2
		CIRCULARITY (ROUNDNESS)		6.4.3
		CYLINDRICITY		6.4.4
FOR INDIVIDUAL OR RELATED FEATURES	PROFILE	PROFILE OF A LINE		6.5.2 (b)
		PROFILE OF A SURFACE		6.5.2 (a)
FOR RELATED FEATURES	ORIENTATION	ANGULARITY		6.6.2
		PERPENDICULARITY		6.6.4
		PARALLELISM		6.6.3
	LOCATION	POSITION		5.2
		CONCENTRICITY		5.11.3
		SYMMETRY		5.13
	RUNOUT	CIRCULAR RUNOUT		6.7.1.2.1
		TOTAL RUNOUT		6.7.1.2.2
* ARROWHEADS MAY BE FILLED OR NOT FILLED				

3.3.1

Figura 2.2: Tabla de las tolerancias geométricas.

La tolerancia geométrica se acota mediante el uso de un marco de control, zona donde se anota lo referente a la misma. Tiene 3 o más compartimentos.

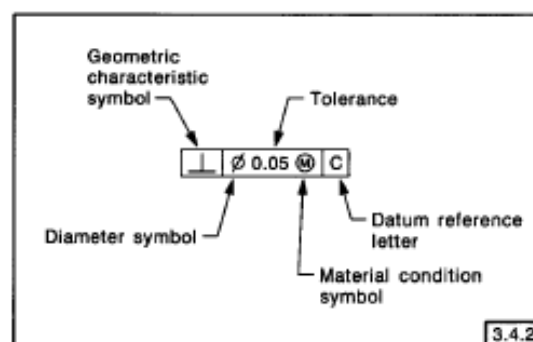


Figura 2.3: Marco de control.

En el primer compartimento contendrá uno de los catorce símbolos de características geométricas, no siendo posible que aparezca más de uno. Si quiere controlarse alguna otra característica, esta deberá ser indicada en otro marco de control.

En el segundo aparece la tolerancia. Esta puede estar precedida de un símbolo de diámetro, y proseguida por una M o una L, que quieren decir condición de máximo/mínimo material. En el caso de que no aparezca ninguno de los modificadores indicados, la tolerancia no cambia y está a una condición en la que no importa el tamaño, llamada RFS (“Regardless of Feature Size”).

Por último, en el tercer compartimento se hace referencia al datum con respecto al cual se va a medir esa tolerancia. Puede haber más de un datum, siendo el siguiente la referencia secundaria, terciaria etc.

Además, la posición del marco de control tiene importancia, en especial su flecha. Si ésta señala una superficie, aplica a la superficie. Pero en el caso de que señale a un elemento de tamaño, entonces controla el eje o plano medio de ese elemento.

Por otra parte, los datums son las referencias con respecto a las cuales medimos las piezas. Los tres planos que puede contener un marco de control son perpendiculares entre sí. Estas referencias son referidas a porciones de la pieza que se está midiendo. Es decir, los planos sólo existen en la teoría, sin embargo debe designarse, de acuerdo al diseño, un conjunto de elementos que formen en la pieza esos tres planos.

2.3 MMC y Tolerancia de posición

En cuanto a los llamados modificadores, el más común es el MMC (maximum material condition). Esta es la condición en la cual una característica dimensional contiene la máxima cantidad de material que permite la tolerancia considerada [2]. Su objetivo es garantizar el montaje de las dos piezas, así como abaratar la fabricación y el proceso de verificación (verificación por atributos, mediante galgas). A partir de las tolerancias dimensionales determina los valores de las tolerancias geométricas necesarias para garantizar el montaje de las piezas. Puede aplicarse tanto a la pieza tolerancia como a la referencia, y también a ambas.

El concepto es sencillo, pero puede llegar a aplicarse en contextos complejos. En un caso simple, un eje, existe más material cuanto más grande es. En un agujero, en cambio, existe más material cuanto más cerrado es.

En cuanto a la condición del mínimo material, la definición es análoga, pero se usa de menos frecuentemente debido a que su utilidad es menor.

Como ejemplo, y tal como se verá posteriormente en el caso práctico, un taladro en una superficie plana es un buen indicativo de cómo aplicar la condición de máximo material.

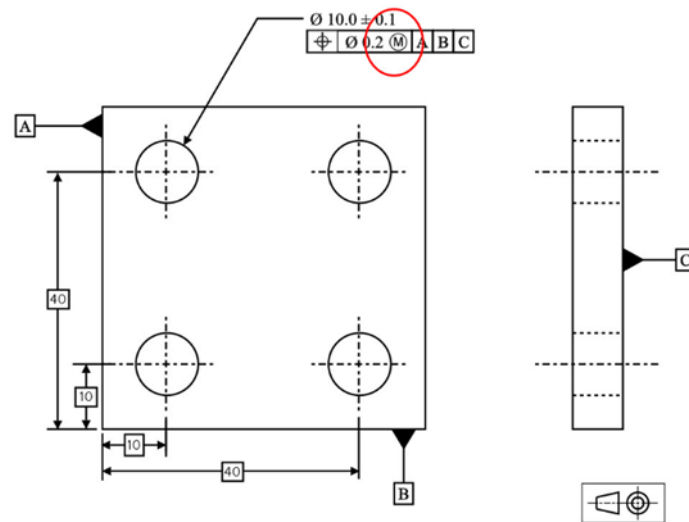


Figura 2.4: Ejemplo de tolerancia de posición con MMC.

En este ejemplo, vemos una pieza sólida, con forma rectangular, que tiene cuatro taladros, uno en cada esquina. Se observa los datums A, B y C, definidos a través de diferentes secciones de la pieza, siendo estos tres planos perpendiculares entre sí. Para acotar la posición de los taladros, se podría haber usado simplemente tolerancias dimensionales, pero se ha optado en este caso por una tolerancia de posición.

La tolerancia de posición define según la norma ASME Y14.5M una zona en la cual el centro, eje o plano medio puede variar con respecto a una posición original.

Aplicándolo de manera concreta a este caso, la tolerancia de posición definida en el marco de control define una zona circular de diámetro 0.2 mm, tomando como posición original el centro del acotado en el plano. Este centro original está posicionado por medio de cotas que aparecen recuadradas, llamadas dimensiones básicas.

Además, debido a que la cota está afectada por una condición de máximo material, modifica la tolerancia de posición en función de la dimensión del diámetro. En caso de que se cumpla el máximo material, es decir, que el diámetro sea lo más pequeño posible, 9.9 en este caso, la tolerancia de posición se mantiene en una zona circular de máximo 0.2 mm de diámetro. Si, en cambio, el diámetro del taladro está en el otro extremo, es decir 10.1 mm, esta zona de posición permitida estaría ampliada hasta 0.4 mm (0.2 original + 0.2 extra por la condición de MMC). Esto se basa en la funcionalidad del taladro, que es su posterior ensamblaje con un eje o un tornillo.

2.4 VALEO SPPC

En otro orden de cosas, hay cotas que son catalogadas como SPPC (Special Product and Process characteristics). Según la norma ISO 16949 [3], las SPPC son aquellas características del producto o bien aquellos parámetros de proceso los cuales si son modificados pueden afectar a la seguridad o al cumplimiento de las normas, a su ensamblaje, funcionalidad o al posterior proceso del producto.

Estas SPPC pueden ser impuestas de manera externa, ya sea por regulaciones o por el cliente, o de manera interna. Si vienen de manera interna, puede ser debido a experiencia previa con algún proyecto o componente similar. En este caso son determinadas por el centro de competencia de cada producto, y formalizadas oficialmente en una lista genérica de SPPC, para cada línea de producto. Además de experiencia previa, estas características pueden venir del AMFE de producto y del AMFE de proceso, o de un posterior DRBFM (Design Review Based on Failure Mode).

Para sacar las SPPC a partir de los AMFE, ya sean de producto o de proceso, tres son los factores que se tienen en cuenta: severidad, ocurrencia y detección. Estas características especiales suponen el límite entre lo aceptable y lo inaceptable, y es por eso que hay que llevar un cuidadoso control sobre ellas. El criterio que se sigue es el descrito en la figura 2.5.

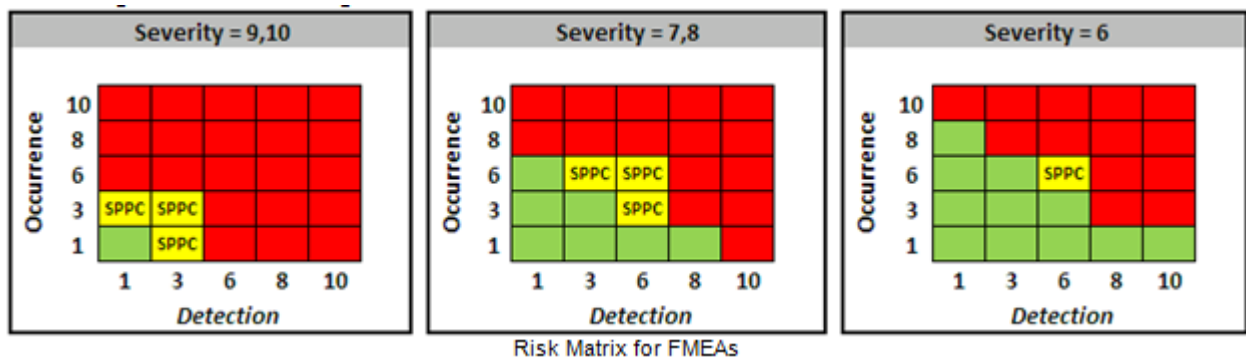


Figura 2.5: Matriz de riesgo usada en el AMFE.

Las SPPC que salen resultantes del AMFE de diseño deben ser definidas antes de establecer los planos y las especificaciones, mientras que las resultantes del AMFE de proceso antes de fabricar los prototipos para validar la fase 2. La responsabilidad de establecer estas características especiales es del equipo de proceso cuando es fabricado internamente, y del equipo de calidad proveedores cuando el proceso es externo.

Una vez estas especificaciones estén controladas, se deben seguir usando la llamada *SPPC Tracking Sheet*, asegurando en ella la consistencia entre los distintos documentos técnicos del proyecto (planos, D-AMFE, P-AMFE, plan de control...).

En cuanto a la relación directa con este trabajo, es la supervisión y el control de estas características lo que hay que llevar a cabo, por medio de una de las siguientes herramientas:

- $Cmk > 2$ o $Ppk > 1.67$ o $Cpk > 1.67$ (claramente demostrado por un control estadístico del proceso).
- O bien un diseño a prueba de error (Poka-Yoke).
- O bien una supervisión automática, revisando el 100% de las piezas producidas o de los parámetros de proceso usados con un $Cmk > 2$.

Además, para operaciones particulares de fabricación, como puede ser la inyección de plástico, estas reglas deben ser estipuladas por un experto. En el caso de procesos externos, estas particularidades tienen que ser revisadas y aprobadas por Valeo SQA (departamento de calidad proveedores) [4].

3. Estado del arte

Como se ha nombrado en el capítulo anterior, las características, cotas en este caso, que han sido catalogadas como especiales deben ser revisadas con un control exhaustivo, y a efectos prácticos estos controles se reducen a: bien un control estadístico del proceso, o bien un control 100% por atributos.

Como las tolerancias geométricas se han ido introduciendo paulatinamente en los planos de las piezas en los últimos años, el control estadístico sobre las tolerancias geométricas ha sido análogo al que se le ha hecho siempre a las dimensionales. Ante la aparición de resultados difíciles de interpretar, la solución ha sido comúnmente hacer un control por atributos, siendo este más costoso en recursos, tanto económicos como temporales.

Por lo tanto, la solución pasa por realizar un control estadístico sobre las mismas, pero el estudio tiene que ser preciso y eficaz, porque de lo contrario no se están controlando correctamente cotas que hemos considerado previamente como críticas para nuestro producto.

3.1 En qué consiste un control estadístico tradicional

En primer lugar, para que un análisis de capacidad tenga lugar es necesario que el proceso esté controlado. Para ello, se usan los gráficos de control. Los gráficos de control se componen de dos gráficos, el de medias y el de rango. Los límites de control son calculados a partir de los datos de nuestra muestra. Estos límites de control no tienen que ser confundidos con los límites de la especificación, pueden coincidir pero no son lo mismo.

Si hay puntos que están fuera de los límites de control, estos se pueden deber a causas no aleatorias, por lo que se eliminarían, si su número es reducido, y volvería a tener lugar una verificación del control del proceso. Si hay puntos situados de manera aleatoria fuera del límite de control, el proceso no está controlado y se debe someter a acciones correctivas par mejorarlo. En el gráfico de rangos se puede observar las variaciones que hay de una muestra a otra dentro de nuestro proceso, y su objetivo es ver si estas variaciones son estables.

El control estadístico de procesos ha sufrido una evolución desde sus inicios. En un principio, el índice C_p hace una comparación entre los límites especificados y la amplitud de la distribución de los datos.

$$C_p = \frac{Tolerance}{6\sigma}$$

El 6 del denominador fue puesto de un modo práctico, debido a que así, con un índice $C_p=1$ se obtenía un 0.27% de las piezas no conformes, algo considerado como admisible en aquel momento. Su principal inconveniente, que pronto fue descubierto, es que sólo funciona en el caso de que la media y la mediana coincidan, es decir, que nuestro proceso esté centrado. En caso contrario, nos podría dar un índice C_p correcto y que en cambio, nuestro proceso no fuera capaz, debido a que esté desviado hacia una de las especificaciones, o que incluso esté fuera de ellas, como en la figura 2.6 [5].

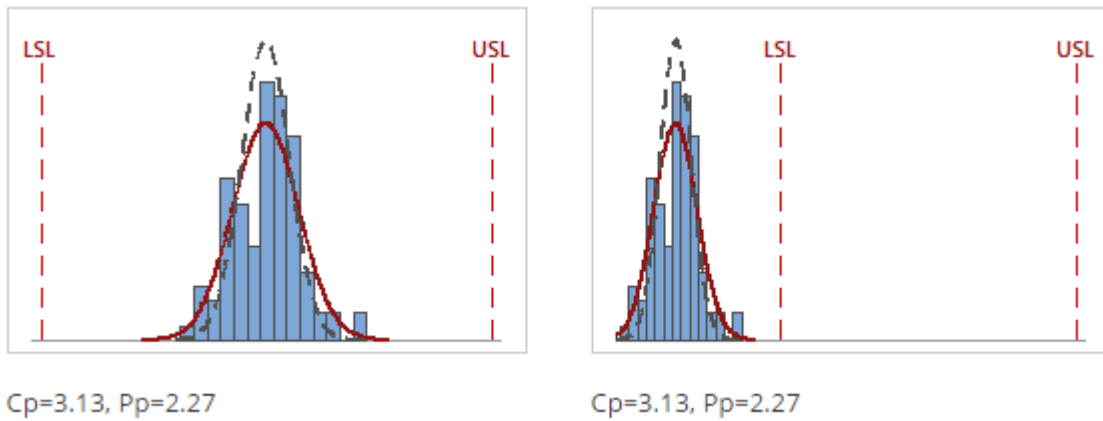


Figura 3.1: Diferentes representaciones gráficas para mismos índices de capacidad.

Para ello, se desarrolló el índice C_{pk} , que como nombra Bothe [6] es definido de la siguiente manera:

$$C_{pk} = \frac{Z_{min}}{3}$$

Siendo $Z_{min} = \text{Min} [Z_{LSL}, Z_{USL}]$:

En palabras, Z es lo lejos que están los límites de las especificaciones de la media de nuestro proceso en número de desviaciones típicas. Con este ajuste en la fórmula de C_p solventamos el problema de que nuestro proceso no esté centrado, pues estamos cogiendo el

$$\begin{aligned} Z_{min} &= \text{Minimum}(Z_{LSL}, Z_{USL}) \\ &= \text{Minimum}\left(\frac{\mu - LSL}{\sigma}, \frac{USL - \mu}{\sigma}\right) \end{aligned}$$

caso más restrictivo.

Se han usado también otros índices para realizar los análisis de capacidad, siendo el más popular el propuesto por Taguchi (1985), llamado C_{pm} :

$$C_{pm} = \frac{USL - LSL}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}}$$

Es útil para los casos de tolerancias asimétricas, ya que T se refiere a la medición objetivo (target). De este modo, un caso de tolerancia dimensional 2.5 +0.2 -0.1 , usando un C_{pk} no estaríamos representando la capacidad correcta de nuestro proceso, porque estaría confundiendo la media con la mediana m, y esto el índice C_{pm} lo evita.

Hay más variaciones de índices utilizados en función de las particularidades que queramos cubrir, y también existe una diferenciación a nivel de elegir todos los datos de nuestro proceso o sólo las variaciones dentro de cada uno de los subgrupos. Esta es la diferencia entre los índices P_p , P_{pk} (Process Performance) y C_p , C_{pk} (Process Capability). Es decir, C_p , C_{pk} miden el potencial que tiene nuestro proceso, cuál sería su capacidad si fuera capaz eliminar todas sus causas especiales. Esto se calcula analizando las variaciones dentro de cada subgrupo, mientras que para medir realmente dónde está nuestro proceso se usan todas las variaciones del mismo, teniendo entonces como resultado entonces los índices P_p y P_{pk} [5].

3.2 Por qué no es válido un control estadístico tradicional

Pero estos métodos no son viables siempre, tienen que cumplir varios requisitos. En primer lugar, para analizar la capacidad de un proceso, tiene que tratarse de un proceso controlado. En segundo lugar, estos índices vistos anteriormente son para procesos con distribuciones normales, y aunque esto ocurre en la mayoría de las veces, no siempre es así. Por último lugar, estamos analizando una sola variable (un diámetro, una longitud, un espesor...), pero no se contempla la posibilidad de tener que analizar algo multivariable, como por ejemplo cuando entran en juego los modificadores de máximo material.

La normalidad o no normalidad de la distribución de nuestro proceso es un aspecto de relevada importancia, y que muchas veces, ante el desconocimiento, no es tenido en cuenta. Un proceso cuya distribución sea no normal, corre el peligro de que saquemos conclusiones equivocadas debido a realizar un análisis de la capacidad del mismo de un modo incorrecto. Y estas conclusiones podrían traer consecuencias económicas no deseadas.

Dos tipos de distribuciones no normales son las que aparecen usualmente: las limitadas y las sesgadas. Por ejemplo, el taladrar un agujero no correspondería totalmente a una distribución normal, ya que el límite inferior es el tamaño del taladro, y ningún agujero puede ser infinitamente grande. O un corte de una chapa, según el esquema de la figura 3.2. Tiene un tope inamovible, pero la chapa puede rebotar en el, no teniendo límite por el otro lado. Este proceso no sería normal, pues tendrá un límite máximo claro (la distancia cuchi-

lla-tope), mientras que por el otro lado tendría la clásica cola [7] [8] [9].

Otro ejemplo sería una perpendicularidad o planicidad, es decir especificaciones que sólo tienen un límite, y que están orientadas hacia el 0, o el 90 en el caso de la perpendicularidad, que es el valor objetivo. Uno de estos casos será evaluado posteriormente en el caso práctico.

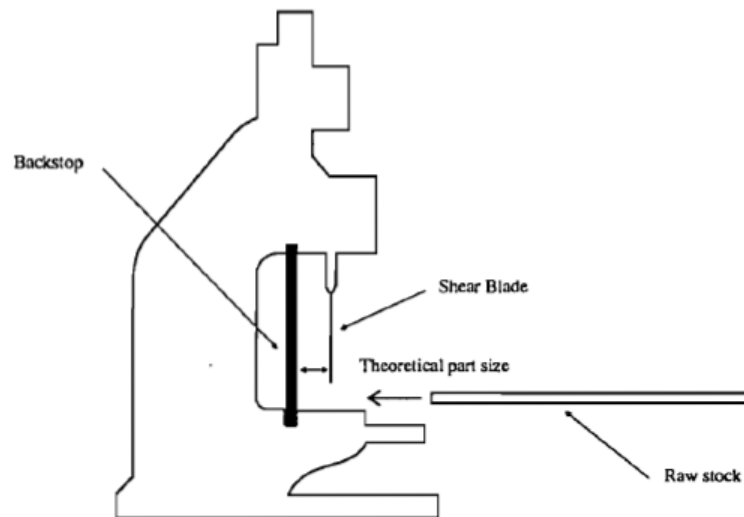


Figura 3.2: Proceso con distribución no normal.

En resumen, podríamos decir que GD&T está considerado un modo de ahorro de coste cumpliendo las mismas especificaciones técnicas. Sin embargo, desde el punto de vista estadístico y del análisis de datos, el hecho de cambiar el problema de univariable a multivariable lo hace más complicado [1].

4. Hitos del trabajo

En cuanto a los hitos que ha ido siguiendo el proyecto, en primer lugar se realizó una revisión de las normas referentes al tema de GD&T. En este punto, se revisaron las normas ISO 14253, ISO 14638, ISO 8015, ISO 2692, ISO 5458, ISO 17450, ISO 22432 ó ISO 25738, todas ellas pertenecientes al ISO TC213 (technical committee), así como la ASME 14.5Y. En todas ellas había información de interés, pero no se refería al control de estas tolerancias sino a la manera de definirlas, acotarlas, interpretarlas, medirlas etc.

Posteriormente se fue a entender el problema, el por qué no era posible aplicar el mismo caso que a las tolerancias dimensionales. Para ello, se buceó en el tema y se comprendieron las causas (no normalidad, multivariabilidad) , y después se buscaron soluciones para ello, presentadas en el método expuesto a continuación.

Por último, un caso práctico fue evaluado, con intención de comprobar que el método propuesto era válido.

5. Método propuesto para solucionarlo

Una vez se han visto los dos problemas principales que nos encontramos al hacer un estudio de capacidad clásico sobre este tipo de tolerancias, como son la no normalidad y la multivariabilidad, a continuación se propone un método alternativo con el fin de obtener resultados fiables.

Para resolver el problema de la no normalidad hay varias soluciones, como el método de puntuación Z o la transformación de Johnson, pero como vamos a ver a continuación estos métodos no pueden solucionar el apartado de la multivariabilidad. Es por ello que se presenta posteriormente un método para paliar este problema.

Método Z

En primer lugar, el método de puntuación Z es el que internamente el software Minitab tiene implantado. Consiste en determinar las proporciones de las observaciones que están fuera de los límites de la especificación, con base a la distribución previamente introducida.

Considerando por ejemplo una distribución Weibull como la de la imagen, esas serían las probabilidades de que las mediciones fueran inferiores a los límites de las especificaciones.

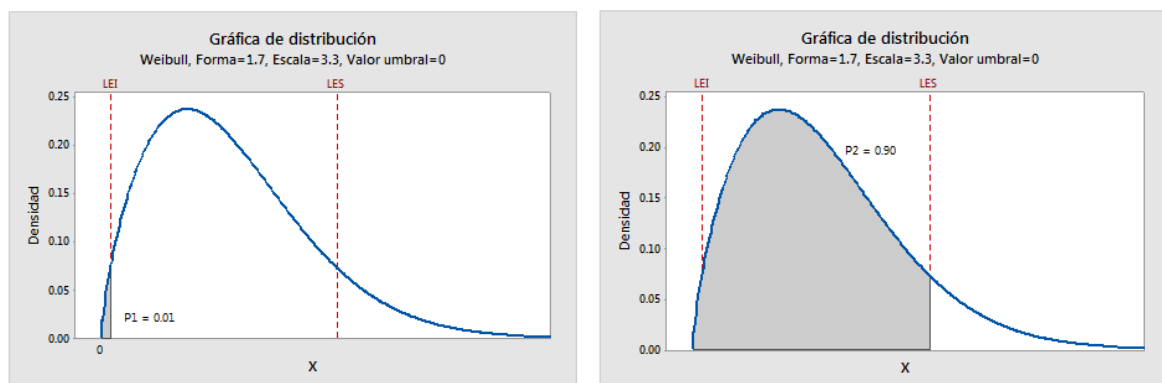


Figura 5.1: Método de puntuación Z

En la imagen de la izquierda, la zona sombreada, llamada P_1 , es la probabilidad de que las mediciones X sean menores que el límite de especificación inferior (LEI) utilizando la distribución especificada. Por otro lado, la zona sombreada de la imagen de la derecha, P_2 representa la probabilidad de que X sea menor que el límite de especificación superior (LES).

Entonces, a partir de las probabilidades P_1 y P_2 se calculan los valores Z correspondientes para una desviación normal estándar, tal como se observa en la figura 5.2.

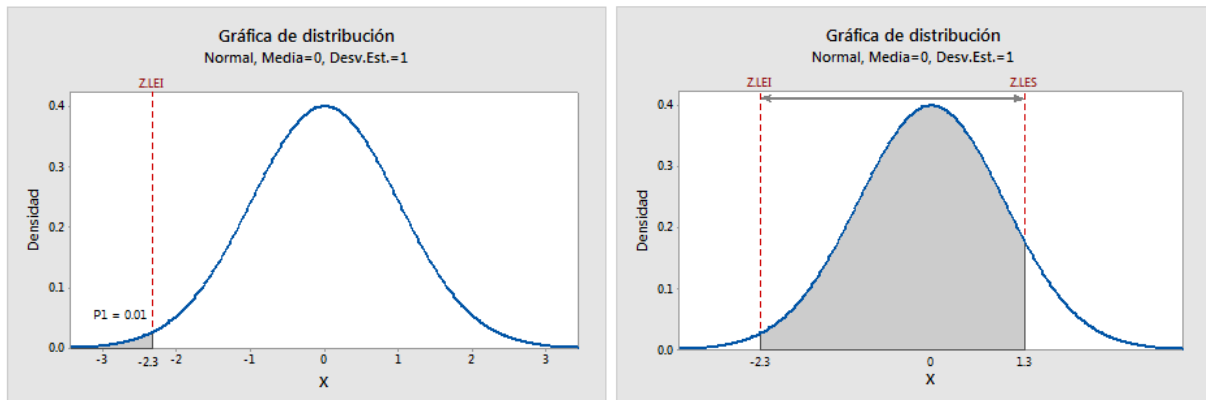


Figura 5.2: Distribución normal estándar análoga a la Weibull original.

Una vez se han calculado estos valores Z y tenemos los valores análogos para una desviación normal estándar, se aplica el análisis de capacidad del modo tradicional.

El principal inconveniente de este método es que hay que conocer con precisión la distribución a la que se ajustan nuestros datos. Muchas veces los datos que tenemos no se ajustan perfectamente a un tipo de distribución, y en el caso de que esta identificación mediante un test de bondad de ajuste no nos de un alto grado de seguridad de que la distribución escogida sea la correcta, puede que los resultados obtenidos posteriormente en el análisis de capacidad no sean correctos, llevándonos entonces a conclusiones equivocadas [5].

Transformación Joshnson

El software Minitab permite también la posibilidad de transformar los datos no normales que tenemos en datos normales. Hay dos maneras principalmente.

Una es la transformación Box-Cox, que es simplemente una transformación de potencia, donde se tiene que elegir un factor λ en función de nuestros datos. Esta transformación es sencilla pero no siempre posible.

Por otra parte, está la transformación de Johnson, que es una función de transformación elegida entre tres familias de funciones del Sistema Johnson (referencia). Debido a que cubre la mayoría de las distribuciones gracias a su amplia gama de parámetros, se encuentra normalmente una transformación aceptable. Tras esta transformación, los nuevos datos pasan una prueba de normalidad (como el test Anderson Darling), verificándose así que nuestros nuevos datos son normales, y se realiza el análisis de capacidad con los datos transformados. Es un método bastante fiable, cuyo principal problema es que no contempla el factor de la multivariabilidad, como se observa posteriormente durante el caso práctico.

5.1 Método de Wang y Luceño

A. Luceño propuso [10] un nuevo índice para calcular la capacidad que él mismo llamó C_{pc} , que se definía de la siguiente manera:

$$C_{pc} = \frac{USL - LSL}{6\sqrt{\pi/2} E|X - m|}$$

La variable m es definida como el valor nominal, y la c del índice se debe a *confidence*, en relación a que los intervalos de confianza que proporciona son fiables.

$E|X-m|$ es normalmente desconocido, y se estima así:

$$\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - m|$$

Es decir, la media de cada desviación con respecto al valor nominal. Como $E|X-m|$ son variables independientes y con una distribución aleatoria, y el estimador es su media, el teorema del límite central dice que éste se aproxima mucho a tener una distribución normal con media $E|X-m|$ y varianza $[X-m]/n$. Además, esta distribución normal produce una aproximación muy buena, aun cuando la muestra sea pequeña.

Los intervalos de confianza $100(1-\alpha)\%$ para C_{pc} son dados por:

$$\frac{\bar{C}_{pc}}{1 \pm t_{\alpha, n-1} s_c / (\bar{c} \sqrt{n})}$$

Estos intervalos son verdaderamente fiables porque no son sensibles a las suposiciones de normalidad, ya que se basan en el teorema del límite central.

Especificación unilateral

Para el caso unilateral, que es el que este trabajo concierne en su mayoría, pues las cotas geométricas más utilizadas en Valeo tienen este tipo de especificación (posición, planicidad, paralelismo, perpendicularidad), el índice de capacidad propuesto por Luceño es el siguiente:

$$\bar{C}_{pc} = \frac{USL - m}{3\sqrt{\pi/2} (\bar{X} - m)}$$

En este caso, m se puede sustituir por 0, ya que suele ser el valor nominal de este tipo de cotas, simplificando bastante los cálculos.

El procedimiento para calcular los intervalos de confianza es igual al caso bilateral.

Esto propuesto por Luceño puede resultar útil para resolver el problema de la no normalidad de nuestra distribución, pero no para la multivariabilidad.

En este punto, primero Davis y Kaminsky [REF], y más tarde Wang [ref], propusieron el uso de la llamada distancia geométrica. Q , como así la denominan, se define así:

$$Q = \sqrt{(x_1 - t_1)^2 + (x_2 - t_2)^2 + (x_3 - t_3)^2}.$$

Refiriéndose las variables x a las medidas, y las t , a los objetivos o targets. Para el caso de dos dimensiones:

$$Q = \sqrt{(x_1 - t_1)^2 + (x_2 - t_2)^2}$$

En nuestro caso, x_1 y t_1 van a referirse al tamaño del diámetro, y x_2, t_2 a la posición. Esta transformación fue demostrada como válida por Davis y Kaminsky [11], asumiendo que cada variable era independiente y se comportaba como una distribución normal, pero luego Wang [12] demostró que no era necesario asumir estas premisas.

Una vez tenemos transformados los datos a nuestra variable Q , hemos reducido el análisis a un problema unidimensional, tal y como era el objetivo.

Una vez en este punto, se puede hacer el análisis tal y como Luceño había propuesto, con una puntualización. Ahora USL, el límite superior de la especificación, va a ser lo denominado MRD (Maximum Radial Distance). Este concepto se explica posteriormente en el caso práctico, debido a que es más fácil de entender con los datos y gráficas delante.

Esta mezcla entre usar la variable distancia geométrica y posteriormente el índice de Luceño había sido propuesto ya por Wang [1].

6. Caso práctico

6.1 Tolerancia de posición de un taladro

Una vez se ha decidido qué cota tiene que ser considerada característica especial, hay que hacer el control mencionado anteriormente sobre la producción de la pieza.

Los datos mostrados a continuación son sacados de un estudio R&R para la validación de un sistema de medición. Sólo 10 de los datos son obtenidos directamente de él (reales), por lo que se ha aplicado el criterio de mantener una misma variabilidad y estabilidad de los mismos para generar más datos y que el caso contenga 30 datos, que son los mínimos requeridos para hacer este tipo de análisis. Además, el plano de la brida no puede ser mostrado por temas de confidencialidad, pero al fin y al cabo el caso expuesto se reduce a un taladro en una superficie plana como es una brida, de modo similar al ejemplo visto en la explicación de la condición de máximo material.

Tenemos las siguientes 30 medidas de la posición del taladro mencionado:

Posición (0,2)
0,023
0,016
0,042
0,009
0,052
0,033
0,026
0,095
0,011
0,087
0,045
0,024
0,031
0,015
0,042
0,006
0,061
0,038
0,027
0,045
0,008
0,01
0,004
0,075
0,11
0,029
0,06
0,017
0,014
0,035

Figura 6.1: Datos sobre los
que se realiza el caso.

En primer lugar, para realizar el análisis de capacidad del proceso, verificamos que el proceso está bajo control estadístico, realizando las gráficas de control sobre los datos. Los resultados obtenidos son los observados en la figura 6.2.

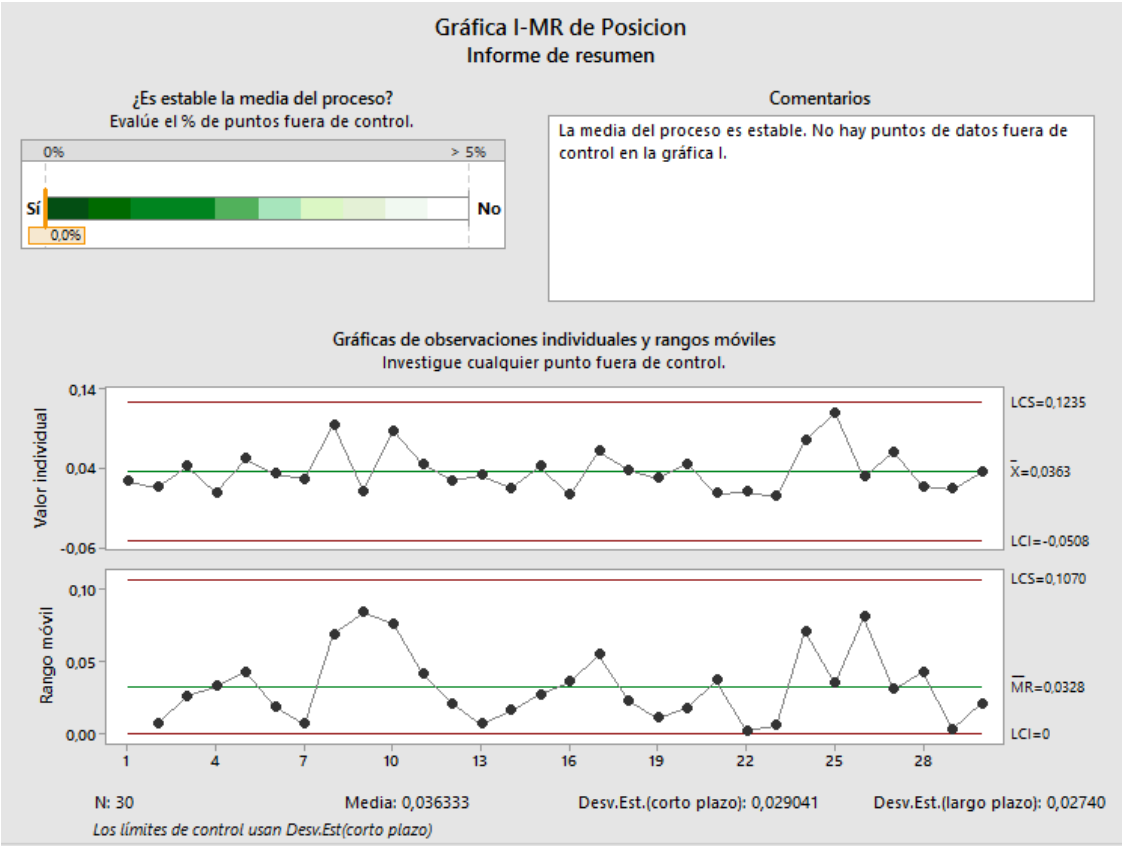


Figura 6.2: Gráficos de control de la variable posición.

En el gráfico vemos que el proceso está bajo control, no hay ningún punto fuera de los límites calculado por el software, y la gráfica de rangos tiene un comportamiento bastante estable también.

Se realiza el análisis primero con Minitab, sometiendo las medidas a un test de bondad de ajuste, obteniendo los siguientes resultados:

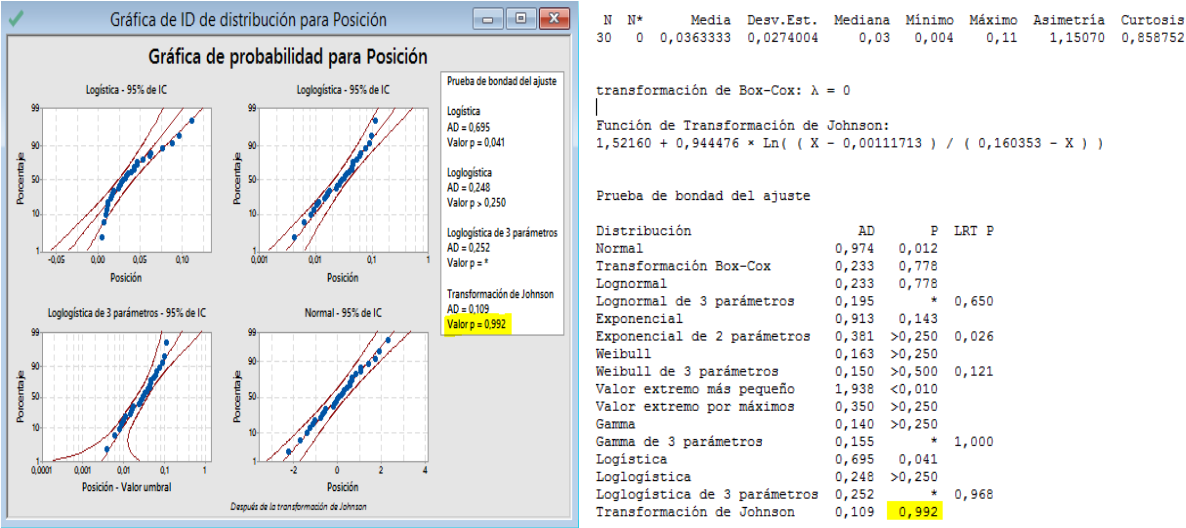


Figura 6.3: Test de bondad de ajuste.

Observamos que en este caso la transformación de Johnson es efectiva, dado que nos da el mayor p-value, y que todos los puntos parecen ajustarse a esa distribución (gráfica de abajo a la derecha). Es por eso que se le aplica un análisis de capacidad normal, y a la hora de seleccionar los datos se especifica que una transformación de Johnson de los datos va a ser realizada. El resultado de tal análisis es el observado en la siguiente imagen.

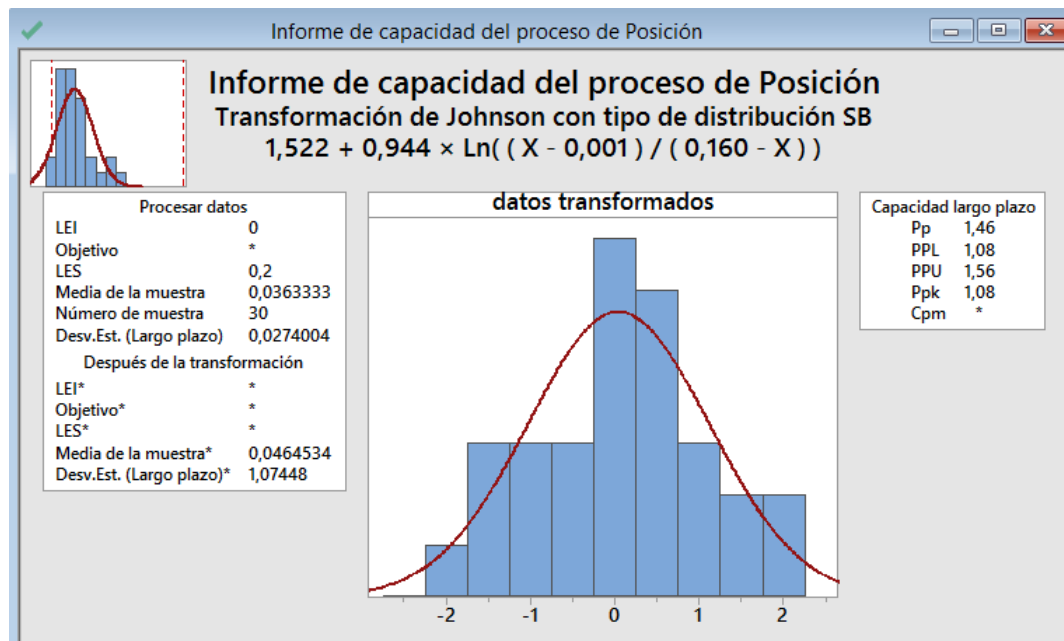


Figura 6.4: Análisis de capacidad mediante transformada de Johnson.

El P_p , que indica la capacidad real a largo plazo de nuestro proceso, es 1.46, por lo que el proceso es capaz, pero no supera las especificaciones internas de Valeo, que es 1.67. Con los datos actuales tendríamos un nivel de PPMs (partes por millón no conformes) mayor al requerido de manera interna. En cuanto a esto, en este momento nos fijamos en P_p y no en P_{pk} porque lo que quiere decir un P_{pk} más bajo que el P_p es que el proceso no está centrado. Pero eso ya lo sabemos, y de hecho nos interesa, porque el proceso no está centrado, sino desplazado hacia el cero, que es nuestro objetivo. P_{pk} corresponde al valor mínimo con respecto a las especificaciones superior e inferior, y en este caso manda la inferior, porque estamos desplazados hacia el 0. Es por esto que estamos tomando el dato de P_p , o P_{pu} en este caso, como la capacidad de nuestro proceso.

Se realiza el análisis de los mismos datos bajo el método de Luceño, tal y como se ha descrito anteriormente. Para ello, como es un caso con una especificación unilateral, la fórmula empleada es la ya anteriormente comentada:

$$\bar{C}_{pc} = \frac{USL - m}{3\sqrt{\pi/2} (\bar{X} - m)}$$

Para el caso unilateral, m se puede considerar cercana a 0, $USL=0.2$, $X=0.03633$ (este dato nos lo proporciona también el programa al hacer el test de bondad de ajuste), por lo que el Cpc nos resultaría exactamente 1.46.

Como vemos, el resultado en este caso es exactamente el mismo, por lo que vemos que la aproximación de Luceño es muy buena.

6.2 Caso con MMC

Para aplicar el método propuesto por Wang [1] a partir de la aproximación de Luceño, se va a aplicar a esta tolerancia de posición una condición de máximo material en función de su diámetro, (2.5 ± 0.3) . Para ello, los datos utilizados son los observados en la columna Diámetro de la figura 6.5.

Medidas	Posición (0,2)	Diámetro M (2,5 \pm 0,3)	Q
1	0,023	2,4850	0,0275
2	0,016	2,503	0,0163
3	0,042	2,561	0,0741
4	0,009	2,521	0,0228
5	0,052	2,511	0,0532
6	0,033	2,498	0,0331
7	0,026	2,485	0,0300
8	0,095	2,493	0,0953
9	0,011	2,508	0,0136
10	0,087	2,481	0,0891
11	0,045	2,513	0,0468
12	0,024	2,492	0,0253
13	0,031	2,496	0,0313
14	0,015	2,507	0,0166
15	0,042	2,512	0,0437
16	0,006	2,497	0,0067
17	0,061	2,486	0,0626
18	0,038	2,503	0,0381
19	0,027	2,492	0,0282
20	0,045	2,498	0,0450
21	0,008	2,506	0,0100
22	0,01	2,51	0,0141
23	0,004	2,507	0,0081
24	0,075	2,502	0,0750
25	0,11	2,496	0,1101
26	0,029	2,497	0,0292
27	0,06	2,506	0,0603
28	0,017	2,511	0,0202
29	0,014	2,503	0,0143
30	0,035	2,496	0,0352

Figura 6.5: Datos para el estudio del caso con MMC

Como se ha comentado en la explicación del método propuesto, a partir de la posición de cada taladro y de su diámetro se saca la distancia geométrica que en este caso vamos a llamar Q, con la siguiente transformación:

$$Q = \sqrt{(x_1 - t_1)^2 + (x_2 - t_2)^2}$$

Siendo en este caso x_1 la medición de las posiciones con los datos mostrados anteriormente; t_1 su valor objetivo, 0 en este caso; x_2 el valor de sus diámetros y t_2 2.5, que es su valor nominal. Tras esta transformación, los datos que nos quedan en la columna Q son las distancias geométricas que se van a usar para el estudio de capacidad de las piezas.

Una vez se tienen los datos, se representan en una gráfica XY donde el eje X es el diámetro de cada muestra, y el eje Y, la posición de cada una de ellas. Con la transformación propuesta arriba, el valor de Q es exactamente la distancia en diagonal que hay desde el origen (objetivo) hasta nuestro dato. Así, todas las distancias geométricas quedan representadas. Cuanto más grande sea el módulo del vector que define cada muestra, es decir Q, más lejos estamos del objetivo.

Además, hay que tener en cuenta que el área de aceptación no se ciñe solamente al 0.2 de valor máximo de tolerancia, sino que, siguiendo el principio de máximo material, la tolerancia es más restrictiva en el caso de máximo material, en este caso para el diámetro más pequeño permitido (2.47 mm), y conforme nos acercamos al mínimo material (2.53 mm), el área de aceptación referente a la posición va aumentando, hasta un punto máximo de 0.26, tal como se ve en la gráfica.

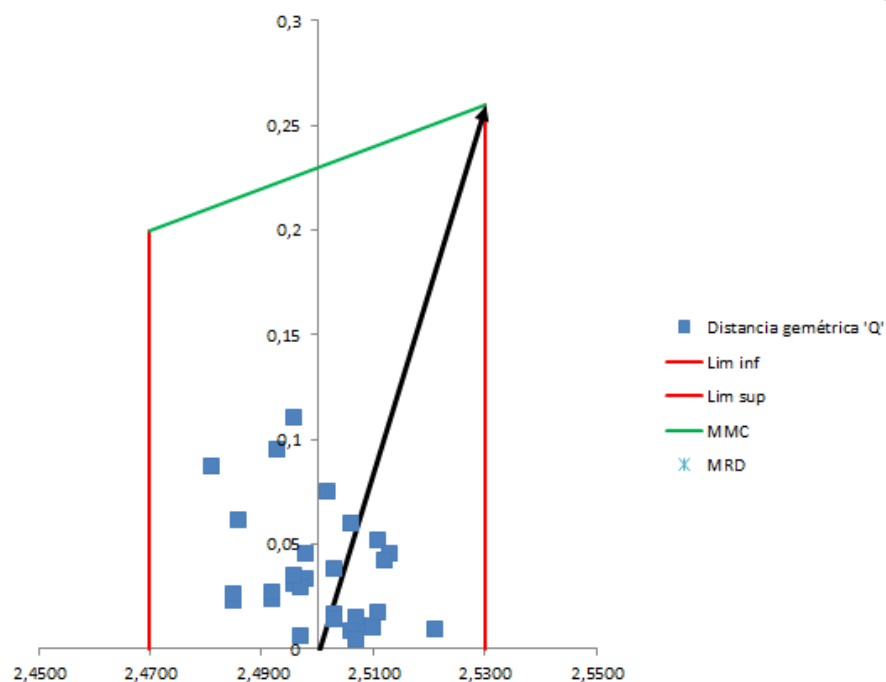


Figura 6.6: representación gráfica de la zona de aceptación

Bien, ahora hemos conseguido reducir el problema de bivariable a univariable, por lo que la variable Q es ahora el objeto de estudio. Se le aplica un test de bondad de ajuste, tal como se había procedido anteriormente, y vemos que no se comporta una variable normal, pero sin embargo volvería a ajustarse bien con una transformación de Johnson.

El software ahora tiene una limitación, y es que al introducir las especificaciones no hay opción de establecer como especificación superior una función, como es nuestro caso, si no que solo permite una constante. Es por ello que el caso que más se ajustaría sería una especificación superior de 0.23, siendo este el punto medio, pero no sería del todo preciso. El resultado, como observamos en la figura 6.7, es de 1.69, mientras que el PpU, que es el que nos interesa, en nuestro caso, pues es el que se fija en el límite superior, limitante en nuestro caso, es 1.82.

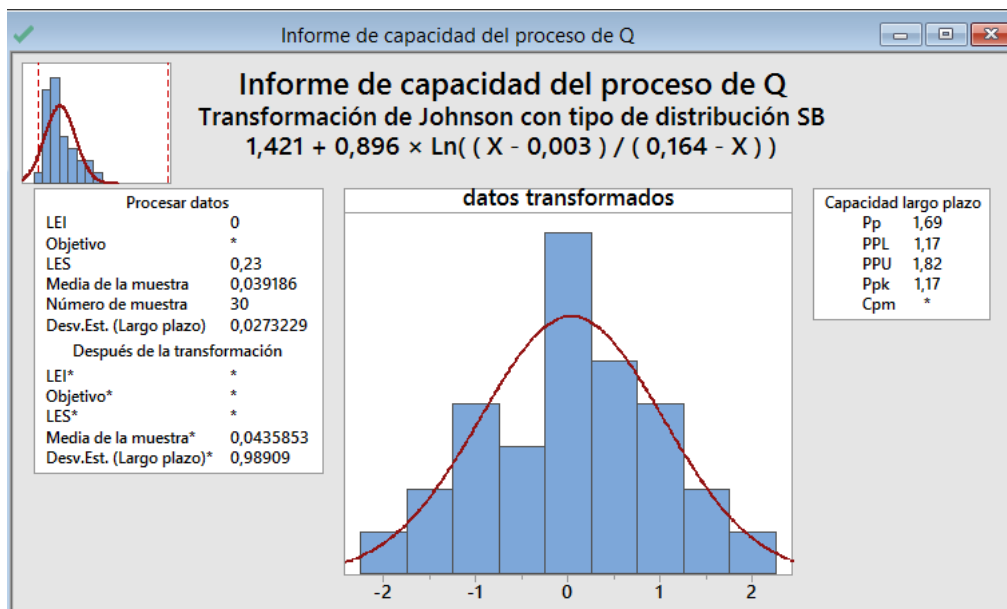


Figura 6.7: Resultados de capacidad con USL=0.23

Si aplicamos en este caso la fórmula propuesta por Luceño, la misma que hemos aplicado anteriormente:

$$\bar{C}_{pc} = \frac{USL - m}{3\sqrt{\pi/2} (\bar{X} - m)}$$

En este caso, m vuelve a ser considerada como 0 debido a que es un caso unilateral, X la media obtenida al hacer el test de bondad de ajuste (0.039186) y USL en este caso no es 0.2, sino que es lo llamado MRD (maximum radial distance). MRD corresponde a la distancia máxima desde el objetivo hasta el perímetro de la región aceptada, en este caso 0.261725 haciendo un simple cálculo por Pitágoras (se corresponde a la línea negra de la

gráfica de la figura 6).

Haciendo el cálculo, queda un C_{pc} de 1.77.

Es un resultado próximo al hallado aproximadamente mediante el software, lo que nos hace entrever que el resultado es correcto.

6.3 Limitación del método propuesto

Este método tiene una **limitación** a la que no puede ofrecer solución alguna. Esta es la siguiente: en el marco de control, los datums son las referencias con respecto a las que se está tomando la medición. Bien, esas referencias suelen ser planos, pero puede darse el caso de que sólo sea un plano el datum primario, es decir, la referencia principal; mientras que las otras dos referencias sean elementos con tamaño, como por ejemplo, dos taladros que se toman como referencias. En este caso, el modificador de máximo material puede afectar también a los datums de referencia, lo que le estaría dando un margen aún mayor a nuestra medida a controlar. Podemos observar este tipo de acotación en la figura 6.8.

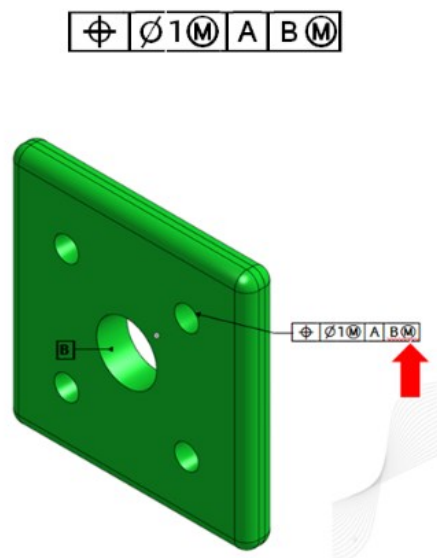


Figura 6.8: Caso con MMC en un datum.

En este caso particular, por ejemplo, las veces que el taladro del medio, que es el datum B, esté en el caso más favorable (caso de mínimo material, es decir, que sea lo más grande posible que la tolerancia de su diámetro permite), ese extra es dado también al taladro que en este caso estamos midiendo, el de arriba a la derecha.

Este caso no tiene una solución trivial, debido a que estamos metiendo más variables a la

ecuación. Además, esta variable va a ser totalmente diferente para cada pieza, y lo que es más importante, no lo podemos relacionar directamente con la dimensión controlada, ya que se refiere a una característica distinta e independiente cada vez. Es por esto que es difícil introducir estos datos en el método propuesto. Gráficamente se estaría modificando el área de aceptación de cada pieza.

Para verlo mejor se va a hacer una modificación del caso práctico anterior. Imaginemos que la especificación ahora es exactamente igual que antes, pero tiene como datum primario el datum A, y como secundario, un taladro de referencia a la condición de máximo material. Bien, este taladro tiene una dimensión de 5 mm de diámetro, con una tolerancia de ± 0.1 . En el caso de que el taladro venga a la medida nominal, 5mm, estaríamos dando un extra de 0.1 mm a la zona de aceptación del taladro original. Bien, esto gráficamente quedaría de la siguiente manera, en comparación con la gráfica del caso anterior, esto sería así:

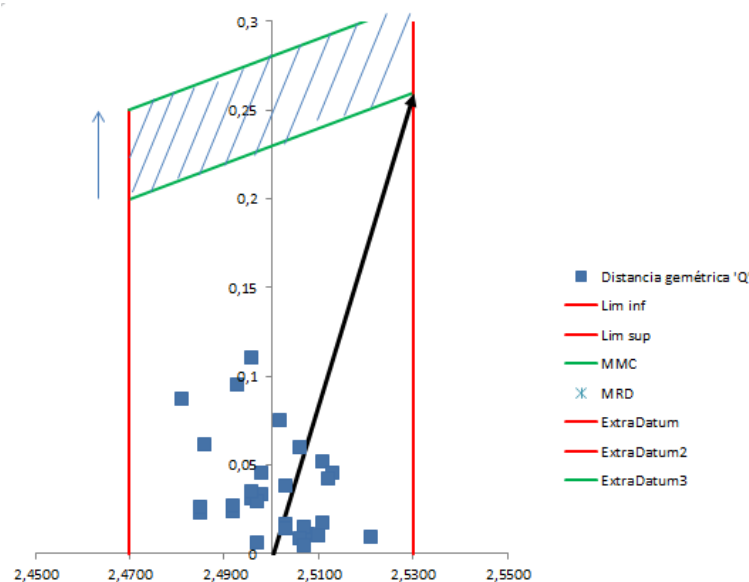


Figura 6.9: Zona de aceptación del nuevo caso

Como se observa, la zona rayada de azul es zona extra de aceptación que le estamos dando a nuestra pieza. El problema es que esta zona extra es independiente en cada una de las muestras, y no se puede establecer una relación global.

En esto consistiría la limitación del método propuesto, siempre teniendo en cuenta que, obviando esto, estamos poniéndonos en el peor de los casos. Es decir, que el método seguiría siendo correcto, aunque no estaría lo suficientemente optimizado.

7. Estimación numérica

Dar un número exacto sobre la mejora a nivel de coste o de PPMs que supone el hecho de utilizar condición de máximo material es muy complicado y sería muy atrevido, ya que depende fuertemente del contexto. Es decir: de sus especificaciones, debido a que en función de la criticidad de la cota o de la funcionalidad de la pieza sus especificaciones, así como sus modificadores, serán más o menos severas; de su proceso, pues cada proceso de fabricación es totalmente distinto; o de la especificación a nivel de calidad que tenga impuesta cada institución.

Pese a ello, S.J. Levy afirma que GD&T permite un 57% más de tolerancia en promedio que la equivalente tolerancia dimensional, tal como vemos en la figura 7.1. Además, si trasladamos el caso a las tres dimensiones, siendo en este caso una esfera el área aceptada en vez de un cubo, este dato pasa a ser un 172% [11] [13].

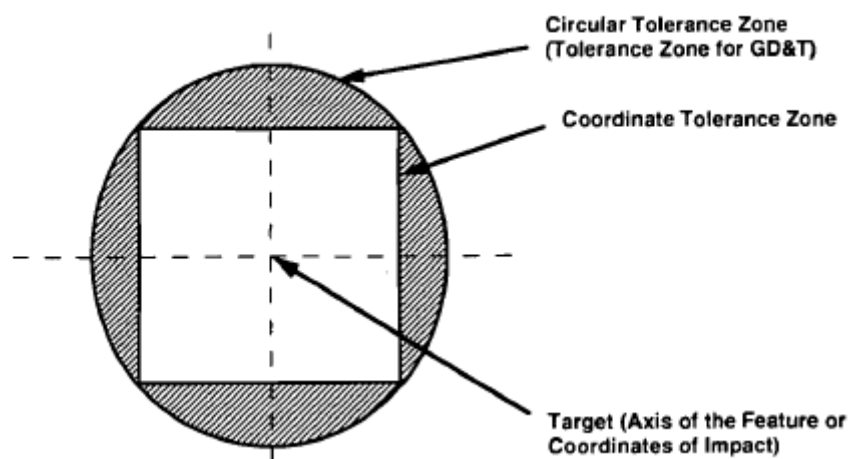


Figura 7.1: Zona de aceptación GD&T vs tolerancia dimensional.

Por una parte, se observa que potenciar el uso de este tipo de acotación va a ser beneficioso. Por otra parte, en cuanto al método expuesto en este trabajo se refiere, va a evitar sacar conclusiones equivocadas sobre los procesos, ya sean de la propia empresa o de proveedores externos, por lo que aquí las consecuencias económicas podrían ir más allá del simple hecho de aceptar piezas o no aceptarlas, afectando a proyectos enteros.

8. Conclusión y líneas futuras

Es posible realizar análisis de capacidad de tolerancias geométricas, y mediante su correcta implantación se fomentará una futura inclinación hacia un mayor uso de las mismas, agilizando así el proceso de entender un plano, y aceptando piezas que sirven para provecho propio, pero que acotadas de la manera tradicional estaríamos tirando.

Para ello es necesario hacer el análisis sobre una sola variable, realizando previamente una transformación como se ha visto en el método propuesto.

Hay que tener en cuenta que el análisis de un proceso sería más preciso si conociéramos bien el mismo y el tipo de distribución que manifiesta, pero esto a veces no es posible cuando nos enfrentamos a un proceso nuevo o desconocido.

Es por ello que el método presentado es un modo sencillo de realizar este análisis como primera aproximación, alejándonos del tremendo error que suponía tratar cualquier distribución con el tradicional C_{pk} , y cumpliendo por lo tanto el objetivo inicial del trabajo, que era dotar de una base técnica a Valeo para poder realizar un procedimiento sobre el que controlar inicialmente este tipo de cotas.

Como líneas futuras de investigación se plantea la limitación ya comentada, en la que hay aplicaciones del modificador MMC en los datums o referencias, dando así un margen extra a nuestra pieza. Con ello se completaría la totalidad de los casos existentes.

9. Bibliografía

- [1] Wang, F.K.; Hubele, N.F. *Quality Evaluation of Geometric Tolerance Regions in Form and Location*. 2002
- [2] The American Society of Mechanical Engineers. *ASME Y14.5M Dimensioning and Tolerancing*. 1994
- [3] ISO 16949
- [4] Valeo. *SPPC Procedure*.
- [5] Minitab support. <https://www.minitab.com/es-mx/support/>
- [6] Bothe, D. *Composite Capability Index for Multiple Product Characteristics*. 1999
- [7] Pzydek, T. *Process Capability Analysis Using Personal Computers*. 1992
- [8] Zhou, Y. *Process Capability Analysis With GD&T Specifications*. 2013
- [9] Gilchrist, W.G. *Capability and Non-Normality*. 1997
- [10] Luceño, A. *A Process Capability Index with Reliable Confidence Intervals*. 1996
- [11] Davis, R.D.; Kaminsky, F.C.; Saboo, S. *Process Capability Analysis for Processes with Either a Circular or Spherical Tolerance Zone*. 1992
- [12] Wang, F.K.; Hubele, N.F. *Quality Evaluation Using Geometric Distance Approach*. 1999

